

一种水电站厂内经济运行算法

陶春华,马光文,涂扬举,陈刚,刘建明,唐明

(四川大学水利水电学院,四川成都 610065)

摘要 介绍一种将惩罚函数、动态修正出力-流量($N-Q$)关系与优化算法相结合实现水电站厂内经济运行的方法。该方法可针对短期优化调度结果(日负荷过程)制定启停计划,实现负荷的经济分配,并且考虑了机组间的效率差异、机组启停成本、气蚀振动区、机组可用性及主接线方式等约束条件。算例表明该方法不仅能解决厂内经济运行的多约束问题,而且能与电力市场下的短期优化调度很好地结合起来。该方法易于实现程序设计且计算速度快。

关键词 水电站 经济运行 启停计划 负荷分配 动态规划 惩罚函数

中图分类号 :F407 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-764X(2007)02-0030-04

An algorithm for economical operation of hydropower plants //TAO Chun-hua, MA Guang-wen, TU Yang-ju, CHEN Gang, LIU Jian-ming, TANG Ming /School of Hydraulic Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract : An introduction was given to an approach to realization of economical operation of hydropower plants, which was based on the penalty function, dynamically amended power-flow relationship and the optimal algorithm. According to the result of short-term optimal regulation, the plan for unit start-up and shut-down could be formulated and the economical dispatching of loads could be realized by the approach with some constraints such as the efficiency difference between different units, the cost of unit start-up and shut-down, the region of cavitation and load vibration, the usability of units, and main wiring mode, taken into account. Case study shows that the approach can be used to solve the multi-constraint problems for economical operation of hydropower plants and can be well combined with the short-term optimal regulation in power market. Moreover, the approach is easily to be programmed and fast in calculation.

Key words : hydropower station; economical operation; plan for start-up and shut-down; load dispatching; dynamic programming; penalty function

电力市场环境下,电站将在满足安全性和可靠性要求的前提下,通过中长期优化调度、短期优化调度和厂内经济运行等调度手段实现资源优化配置,降低生产成本,提高市场竞争能力,最终实现收益最大化的目标^[1]。因此,厂内经济运行已经成为电站优化调度的重要内容之一。目前,对厂内经济运行的研究较多,但很少考虑机组启停成本、气蚀及振动区、机组可用性及主接线方式等约束条件对机组运行情况的影响,更缺乏与电力市场环境短期优化调度结合起来的厂内经济运行研究。未能充分考虑约束条件的厂内经济运行必然导致计算结果与生产实际脱节,影响安全生产,增加机组的维护费用,降低机组寿命,不利于发电商收益最大化目标的实现。厂内经济运行和短期优化调度都是电站生产过程中的重要调度手段,只有将两者紧密结合才能更好地实现资源的优化配置,更好地实现发电商收益最大化目标。

目前,用于解决厂内经济运行的优化方法主要有:启发式方法,如优先权列表、经典优化算法,如动态规划、拉格朗日松弛法、线性规划、整数规划等;人工智能法,如专家系统、神经网络、模拟退火、遗传算法等^[2]。动态规划法是一种应用非常广泛的全局优化算法,具有很多其他算法不具备的优点。本文采用该方法实现厂内经济运行,用惩罚函数、动态修正出力-流量($N-Q$)关系的方法处理约束条件,以短期优化调度结果的 96 点日负荷作为负荷输入,优化结果为各时段水电站开机组合及负荷分配。算例表明,该方法容易实现程序设计,计算时耗费系统资源少,速度快。

1 数学模型

1.1 模型建立

水电站厂内经济运行是在满足电能生产安全、可靠、优质的条件下,合理地调度发电设备,以期获

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50539140)

作者简介:陶春华(1978—),男,四川安岳人,博士研究生,从事水电经济管理研究。E-mail:scutaoch@gmail.com

得尽可能大的经济效益^[3]。在总出力一定的条件下,通过优化计算实现机组启停计划和最优负荷分配,使总耗水量最小。其数学模型为

$$\left\{ \begin{aligned} W = \min & \sum_{t=1}^m \left\{ \sum_{i=1, i \neq K}^n Q_i(N_i(t))T + \right. \\ & \left. C_i(t)X_i(t)[1 - X_i(t-1)] \right\} \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1, i \neq K}^n N_i(t) \geq N_d(t) + N_w \\ & N_i(t) \leq N_{5\%}(h) \\ & Q_{i\min} \leq Q_i(N_i(t)) \leq Q_{i\max} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: W 为指定水位及负荷情况下,计算周期的最小总耗水量; $Q_i(N_i(t))$ 为机组的出力-流量关系,代表 t 时段第 i 台机组在负荷 $N_i(t)$ 下所需发电流量; $N_i(t)$ 为机组 i 在 t 时段的负荷; T 为计算周期内各时段长度,根据电站所在电力市场确定,如96点电力市场的时段长度为900s; $C_i(t)$ 为 t 时段机组启停耗水量及开停机导致维护费用增加值和机组寿命损失的水量折算; $X_i(t)$ 为第 t 时段内第 i 台机组开机状态,开机时为1,关机时为0; K 为不可用机组的序号; $N_d(t)$ 为 t 时段电站的发电任务,该数据可以是短期优化调度结果,也可以是电网下达的发电计划; N_w 为开机方式及负荷组合对应主接线方式的功率损耗; $N_{5\%}(h)$ 为机组的5%出力限制; $Q_{i\min}$ 和 $Q_{i\max}$ 分别为第 i 台机组的最小和最大过流量; i 为机组序号, $i=1,2,\dots,m$; t 为时段序号, $t=1,2,\dots,m$ 。

负荷约束采用不等式约束实现,以降低等式约束的强度。

1.2 约束条件处理

1.2.1 机组启停成本

影响机组启停成本的因素比较复杂,可概括为3个主要方面:启停过程中的水量损失、机组维护成本增加值和设备服务年限降低引起的损失。机组启停过程中不发电但存在耗水,并且维护成本会随启停次数增加,这两部分损失可通过试验或运行经验获得。对于设备服务的年限,研究表明:一般而言机组每启停1次约降低运行寿命10~15h,而每年启动150次的机组,运行寿命甚至降低20%。为了掌握与电站机组启停成本相关的主要因素及其数量关系,Nilsson在瑞典主要的发电厂商协助下进行了系列研究,其研究成果认为每启停1次机组维护成本增加值和设备服务年限降低引起的成本是3美元/MW^[4]。可以将启停成本按式(2)折合为水量 C_i :

$$C_i = Q_w + \frac{M}{9.81\eta HP} \quad (2)$$

式中: Q_w 为启停机耗水量; M 为机组启停导致的维护费用和设备寿命损失成本; η 为机组设计效率; H 为机组设计水头; P 为电站平均上网电价。

1.2.2 气蚀振动区

机组在某些出力和水头区域运行时,会出现严重的气蚀和振动现象,该区域分别称为气蚀和振动区。气蚀是过机水流由于气化形成气泡并在高压下破裂引起的,对水轮机过流部件产生不利的冲击现象;振动是机组由于机械、水力及电磁等振动作用引起的共振现象。气蚀和振动都严重威胁着电站的安全生产和机组的使用寿命,因此厂内经济运行应该引起高度重视。为了使机组尽量避开气蚀振动区运行,可用惩罚函数^[5]对机组振动区的流量-出力关系进行修正,即

$$Q_i(N_i) = Q_i(N_i) + \alpha A \quad (3)$$

式中: α 为气蚀振动区识别系数,当处于气蚀振动区时 $\alpha=1$,处于非气蚀振动区时 $\alpha=0$ 。 A 为惩罚量,可以根据电站对气蚀和振动的要求确定, A 越大机组越能避开气蚀振动区运行。在某水头下,机组的振动区为50~100MW,修正前后的出力-流量曲线如图1、图2所示。在耗流量最小的优化目标下,由于气蚀振动区存在惩罚量,优化结果会自动地避开振动区。

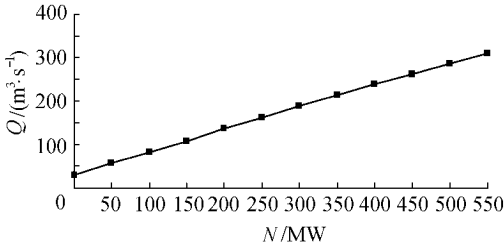


图1 机组出力-流量曲线

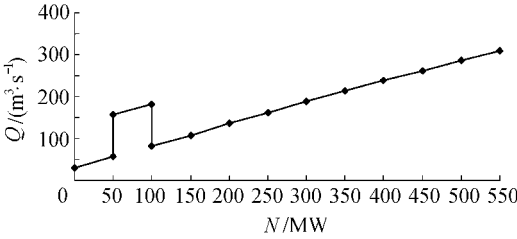


图2 惩罚后的出力-流量曲线

1.2.3 机组可用性

电站实际生产中存在部分机组不能投入使用的情况,如机组承担备用及检修等,因此在厂内经济运行中应该考虑机组的可用性。对于不可用机组,直接令其出力为零。也可用惩罚函数的思想,对其流量-出力关系进行修正,即

$$Q_i(N_i) = Q_i(N_i) + \beta B \quad (4)$$

式中: β 为机组 i 的可用性系数,机组可用时 β 为0,

反之则为 1 ;B 为惩罚量。

1.2.4 主接线方式

水电站由于自身特点和电网要求 ,主接线方式不同 ,在不同的主接线下运行时电气损耗也不同 ,但以前的厂内经济运行中一般忽略了其影响。某电厂主接线方式如图 3 所示 ,不同运行方式时铜、铁损必然不同 ,因此应该充分考虑。该问题可以通过虚拟机组技术^[6]解决 ,但该方法会增加维数并影响计算速度。本文提出根据相应开机组和负荷分配的电气损耗动态修正出力-流量关系曲线的方法 ,修正公式为

$$Q(N_i) = Q(N_i) + \frac{\Delta P}{9.81 \eta H} \quad (5)$$

式中 ΔP 为在相应的开机组和负荷分配情况下机组 i 的电气损耗。

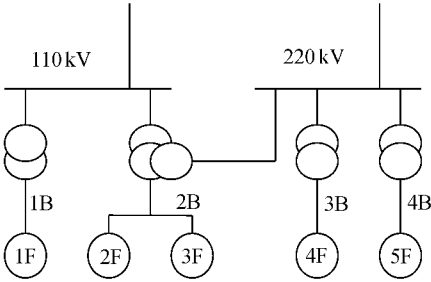


图 3 某电站主接线

2 模型求解

公式 1 描述的是多时段多机组间的启停计划和负荷分配问题 ,其计算复杂、维数高 ,对优化算法要求较高 ,在以前的研究中曾使用退火遗传等算法进行求解 ,这样能较好地处理约束条件 ,并且计算速度较快 ,计算结果也明显优于确定性优化算法 ,但存在随机算法普遍存在的稳定性问题(即多次计算的结果间存在一定差异) ,因此在实际使用时受到一定的局限。本文试图通过动态规划法对模型进行求解 ,流程如图 4 所示。图中 t 为时段序号 , i 为机组序号 , j 为状态变量累计出力 , J 为第 $i-1$ 号机组出力 , N_i 为第 $i-1$ 号机组容量 , Q_m 为目标函数 , Q_{0ij} 为 1~ i 机组总出力为 j 时的最优目标函数 , $Q_i(H, J)$ 为机组 i 在水头 H 时的出力-流量关系 , C 为机组的启停成本(两个时段间机组不存在启停时为零) , d 为出力离散长度。

3 算例

以某大型水电站为例 ,该电站有 6 台装机容量为 550 MW 的机组。由于电站实际只对机组 5 进行了原型机效率试验 ,因此其他 5 台机组数据是在机组 5 基础上假设的 ,但是并不影响计算 ;负荷输入为电力市场下电站某日短期优化调度获得的 96 点日

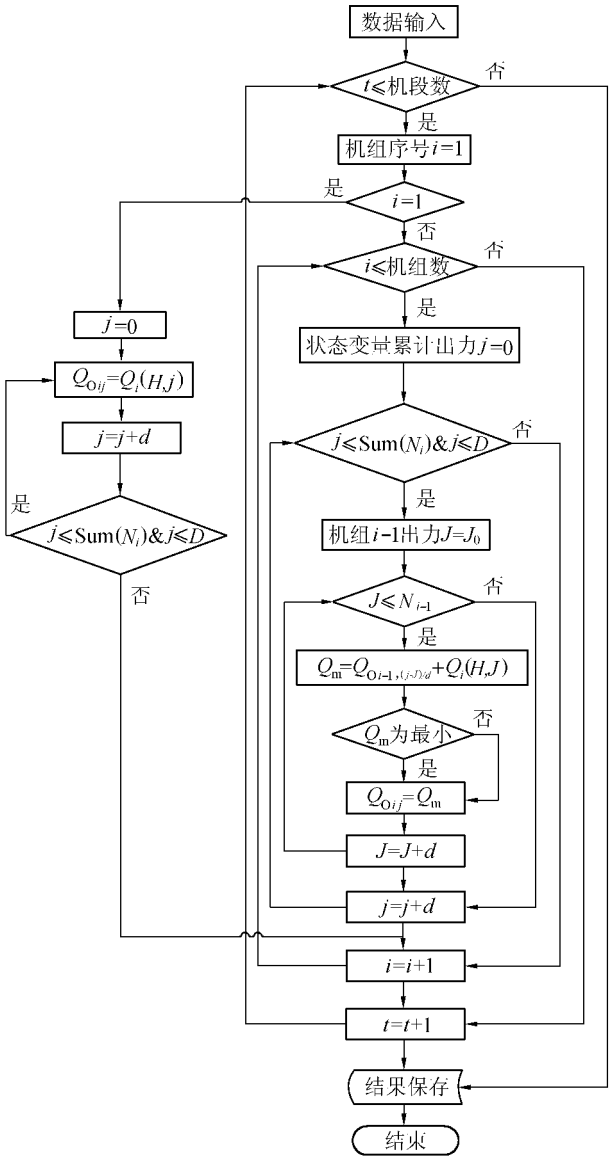


图 4 厂内经济运行流程

负荷 ,见图 5 ;参照文献[4] ,水电站的启停成本按 1 次 3 美元 /MW 计算 ,假设平均上网电价为 0.035 美元 ,则启停成本水当量约为 110 000 m³。对该电站进行厂内经济运行计算 ,结果见表 1。

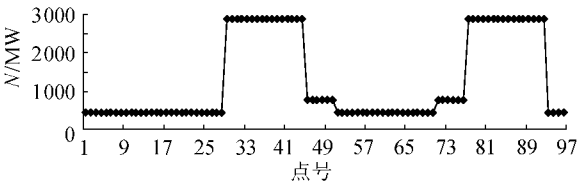


图 5 电站短期优化调度 96 点日负荷

算例中使用了惩罚函数和动态修正出力-流量关系的方法处理约束条件 ,并用动态规划法求解。由计算结果可见 ,在有机组启动的时段增加了启停成本(水当量约为 110 000 m³ / (台 · 次)) ,如时段 28 与时段 29 ,时段 76 与时段 77 之间就存在启动成本 ,需要注意的是启停成本中包括启停中的维护和寿命

表 1 优化结果

时段序号	时刻	时段负荷/ MW	机组负荷分配/MW						耗水量/ m ³
			机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6	
1	0 00 00	450	0	0	0	0	450	0	216566
2	0 15 00	450	0	0	0	0	450	0	216566
28	6 45 00	450	0	0	0	0	450	0	216566
29	7 00 00	2900	550	550	550	150	550	550	1967 679
30	7 15 00	2900	550	550	550	150	550	550	1417 679
76	18 45 00	772	0	225	0	0	550	0	380 673
77	19 00 00	2900	550	550	550	150	550	550	1857 679
78	19 15 00	2900	550	550	550	150	550	550	1417 679
96	23 45 00	450	0	0	0	0	450	0	216566

注 :由于该水电站网路限制 ,电站最大出力为 2900 MW。

成本的水量折算 ,它并不是启停过程中实际消耗的水量 ,而是成本的水当量。另外 ,由表 1 可见机组 5 在中、高负荷时效率较高 ,机组 2 和机组 6 次之 ,机组 4 效率最低。

4 结 语

本文将惩罚函数、动态修正出力-流量关系与动态规划结合 ,解决了电站厂内经济运行中的多约束问题 ,并将短期优化调度的输出(96 点日负荷)作为厂内经济运行的输入 ,使两大调度手段紧密结合起来。模型中充分考虑了机组启停成本、气蚀振动区、机组可用性及主接线方式等约束条件 ,使优化结果更符合电厂的实际生产情况。算例结果表明本文方法易于实现程序设计且计算速度快 ,具有实用性。

(上接第 21 页)

[6] YANG Dai-quan ,SHEN Zhu-jiang. Two-dimensional numerical simulation of generalized consolidation problem of unsaturated soils[C]//7th Int Conf Computer Methods and advances in Geomech. Cairns ,1991 :1261-1266.

[7] YIN Zong-ze , SUN Chang-long , MIAO Lin-chang. Consolidation of unsaturated expansive soils [C]//2nd International Conference on Unsaturated Soils. Beijing : International Academic Publishers ,1998.

[8] Chang C S , DUNCAN J M. Consolidation analysis for partly saturated clay by using an elastic-plastic effective stress-stating mode[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics ,1983 ,7(1) 39-55.

[9] 张庆华 ,丁学福 ,孙长龙. 非饱和土固结一维半解析解 [J]. 水道港口 ,1996(3) 33-41.

[10] 魏海云 ,詹良通 ,陈云敏. 高饱和度非饱和土的压缩和固结特性及其运用[J]. 岩土工程学报 ,2006 ,28(2) 264-269.

[11] 杨代泉 ,沈珠江. 非饱和土的一维固结简化计算[J]. 岩

参考文献 :

[1] 马光文 ,王黎. 水电竞价上网优化运行[M]. 成都 :四川科技出版社 ,2003.

[2] DUDEK G. Unit Commitment by genetic algorithm with specialized search operators[J]. Electric Power Systems Research 2004 ,72 299-308.

[3] 张勇传. 水电站经济运行管理[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,1998.

[4] 阿尔塞 A ,马元 . 伊泰普水电站水轮发电机组的优化调度[J]. 水利水电快报 ,2002 ,23(20) :1-4.

[5] 权先璋 ,蒋传文 ,李承军. 水电站 AGC 中的惩罚函数及虚拟机组技术[J]. 华中理工大学学报 ,2002 ,30(7) 91-94.

[6] 权先璋 ,蒋传文 ,李承军 ,等. 水电厂内经济运行问题中的主接线运行方式约束的研究[J]. 水电能源科学 ,1999 ,17(3) 38-39. (收稿日期 2006-06-30 编辑 :高建群)

土木工程学报 ,1991 ,13(5) :70-78.

[12] SHEN Zhu-jiang. Reduced suction and simplified consolidation theory for unsaturated soils [C]//Proc First Int Conf Unsaturated Soils. Rotterdam ,Pairs :Balkema A A ,1995 :1533-1540.

[13] RAHARDJO H. The study of undrained and drained behavior of unsaturated soil[D]. Saskatchewan , Canada : University of Saskatchewan ,1990 :259-269.

[14] BISHOP A W ,ALPAN I ,BLIGHT G E , et al. Factors controlling the shear-strength of partly saturated cohesive soils [C]//ASCE Conference on Shear of Cohesive Soils. Colorado : University of Colorado ,1960 :503-532.

[15] AITCHISON G D. Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soil[C]//Pore Pressure and Suction in Soils conf. London : Butterworths ,1961 :47-52.

[16] FREDLUND D G ,RAHARDJO H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐 ,张在明 ,陈愈迥 ,等译. 北京 :中国建造工业出版社 ,1997. (收稿日期 2006-08-16 编辑 :高建群)